

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМАМИ ТОПЛИВОПОДАЧИ ДИЗЕЛЕЙ

*М.Г. Крупский, к.т.н., доцент, В.Е. Кузин, к.т.н., доцент, Э.В. Широких, к.т.н., доцент,
А.Д. Головачев, ст. преподаватель
Коломенский институт (филиал) Московского государственного открытого университета*

Представлены варианты перспективных систем управления топливоподачей дизелей с расширенными функциональными возможностями за счет использования эффективных приводов на основе пьезоактюаторов, обладающих существенно меньшими периодами задержки исполнения командного сигнала по сравнению с электромагнитными приводами.

Одним из путей совершенствования современных электроуправляемых систем топливоподдачи (ЭСТ) двигателей внутреннего сгорания является использование в их исполнительных устройствах быстродействующих приводов с применением пьезоактюаторов (ПА), на основе которых могут создаваться высокоэффективные системы управления.

Современные ПА, обладая высокой реакцией отклика на изменение управляющего электрического сигнала и стабильностью дифференциальных характеристик перемещения, одновременно способны обеспечить аналоговое деформационное перемещение дозирующих элементов ЭСТ с нанометрической разрешающей способностью, что повышает их качественные характеристики.

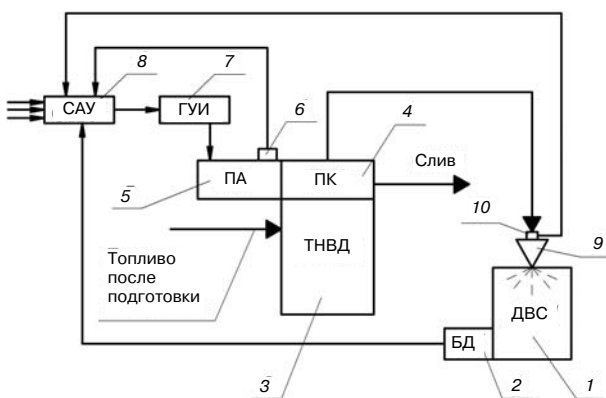


Рис. 1. Функциональная схема импульсной системы топливоподдачи с пьезоэлектрическим перепускным клапаном:

1 — ДВС; 2 — блок датчиков; 3 — ТНВД; 4 — перепускной клапан; 5 — пьезоактюатор; 6 — датчик осевого перемещения ПА; 7 — генератор управляющих импульсов; 8 — система автоматического управления; 9 — форсунка; 10 — датчик давления

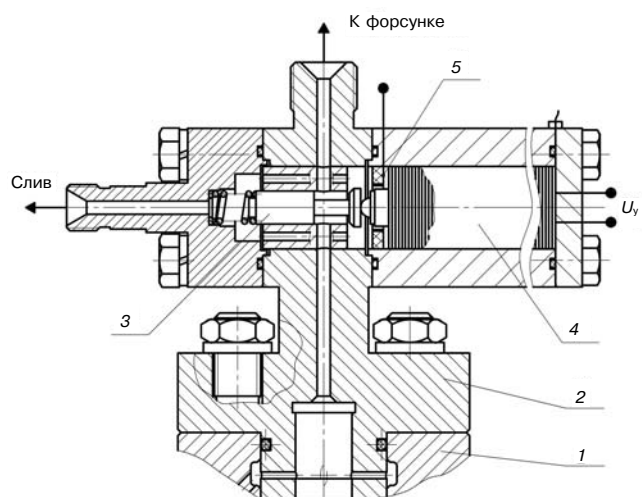


Рис. 2. Конструктивная схема ТНВД с перепускным клапаном:

1 — ТНВД; 2 — корпус ПК; 3 — затвор; 4 — пьезоактюатор; 5 — датчик осевого перемещения ПА

В настоящее время в различных областях машиностроения ПА достаточно широко используются в качестве приводов в механизмах точных перемещений. В частности, в двигателестроении уже имеется прецедент выпуска серийных форсунок и насос-форсунок с пьезоэлектрическими клапанами, например, освоенных фирмами SIEMENS и BOSCH.

При этом работа всех известных приводов основывается на использовании исключительно осевого деформационного перемещения ПА.

В последнее время учеными КИ (ф) МГОУ получено семь патентов на микроэлектронные системы топливоподдачи ДВС с использованием пьезоактюаторов.

В одной из них [1] используется традиционный топливный насос высокого давления (ТНВД), снабженный перепускным клапаном (ПК) с нормально открытым затвором, привод которого осуществляется от наборного ПА осевого перемещения (рис. 1 и 2).

Другая система [2] основана на использовании ТНВД (рис. 3) принципиально новой конструкции, в котором для вытеснения топлива из камеры сжатия используется погружной ПА объемного принципа действия. Цикловая подача топлива достигается объемным расширением ПА при подаче

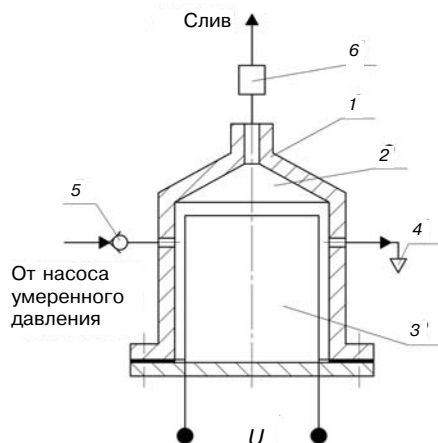


Рис. 3. Конструктивная схема бесплунжерного ТНВД на основе пьезоактюатора объемного принципа действия:

1 — корпус ТНВД; 2 — камера сжатия; 3 — ПА объемного принципа действия; 4 — форсунка; 5 — обратный клапан; 6 — устройство для стравливания воздуха

на него управляющего электрического сигнала. При этом приращение объема ΔV_a пьезоактюатора определяется положительной разницей между увеличением осевого размера ПА и одновременным уменьшением его поперечного размера (в перпендикулярном направлении). Чем больше разность коэффициентов деформации по этим направлениям, тем больше объемный пьезоэффект. Серьезным преимуществом такого ТНВД является предельная простота конструкции и отсутствие сложных прецизионных и кинематических элементов, а также то, что он может работать с традиционной нормально-закрытой форсункой.

Экспериментально была произведена оценка возможностей управления законом осевого перемещения ПА изменением параметров командного сигнала. Опыт использования электромагнитных силовых приводов в различных микроэлектронных системах топливоподачи показывает, что наибольшими возможностями управления дифференциальными характеристиками впрыскивания топлива обладают системы с многоимпульсным командным сигналом.

В качестве генератора управляющего сигнала использовался универсальный электронный блок формирования командных импульсов, разработанный и созданный в КИ (Ф) МГОУ. Управление дифференциальными характеристиками перемещения ПА осуществляется при постоянном напряжении питания с параметрами командного сигнала. На рис. 5 приведена группа осциллограмм, иллюстрирующих возможности управления дифференциальными характеристиками ПА осевого перемещения при постоянном напряжении питания $U = 140$ В.

Исследовался промышленный образец наборного ПА от серийной пьезоэлектрической форсунки фирмы SIEMENS.

Эксперименты показали, что величина задержки исполнения командного сигнала (рис. 5, а) по переднему фронту составляет 50 мкс, а по заднему — 70 мкс, что меньше, чем у лучших быстродействующих электромагнитных приводов для клапанов с идентичными механическими характеристиками соответственно в 4 и более чем в 10 раз [3].

Рис. 5, б иллюстрирует управление крутизной переднего фронта осциллограммы перемещения, а на рис. 5, в показаны примеры формирования его ступенчатой формы.

На рис. 5, г приведена группа осциллограмм, представляющих управление параметрами паузы при двухфазном срабатывании ПА.

На рис. 5, д изображены осциллограммы, показывающие возможность управления амплитудой перемещения ПА за счет длительностей заряжающей и разряжающей частей первого импульса двухфазного командного сигнала. При этом, как показывает эксперимент, стабилизация амплитуды осевого перемещения при ее падении вследствие утечки заряда в зависимости от времени возможна за счет корректирующих импульсов.

Во всех случаях управление осуществлялось изменением длительностей импульсов и паузы между первой и второй фазами при постоянном напряжении питания.

Возможность получения объемного пьезоэффекта также проверялась экспериментально. Было установлено, что при обжати пьезоэлементов из различных пьезокерамических материалов, помещенных непосредственно в дизельное топливо, вплоть до давлений $P = 200$ МПа наблюдалась

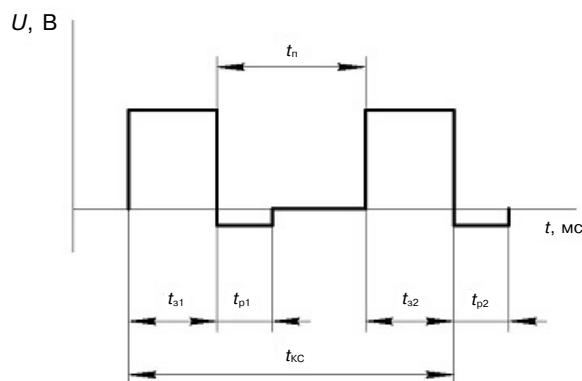


Рис. 4. Параметры командного сигнала управления пьезоактюатором:

$t_{кс}$ — длительность командного сигнала; $t_{с1}$, $t_{с2}$ — соответственно длительности заряжающих импульсов первой и второй фаз; $t_{р1}$, $t_{р2}$ — соответственно длительности разряжающих импульсов первой и второй фаз; t_n — пауза между первой и второй фазами

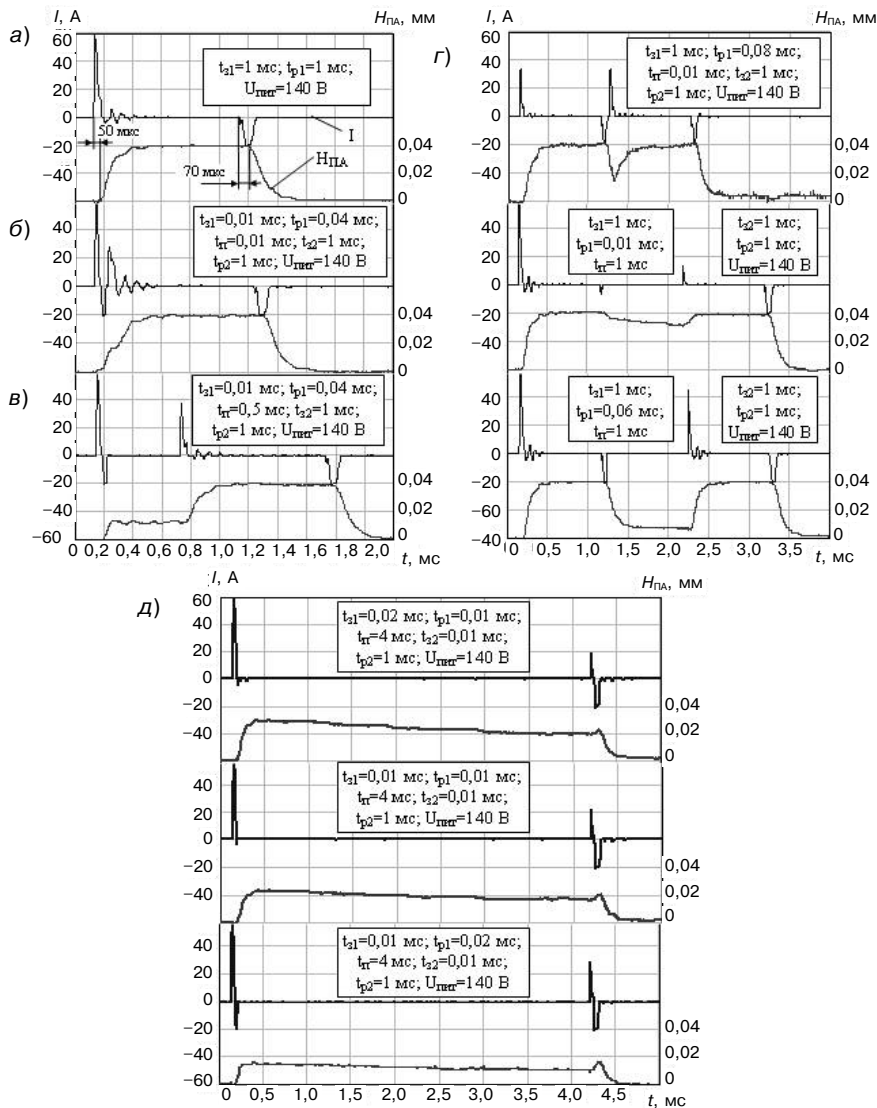


Рис. 5. Экспериментальные осциллограммы дифференциальных характеристик тока I в цепи питания и перемещения $H_{ПА}$ осевого ПА, иллюстрирующие:
 а — быстрдействие ПА; б — управление крутизной переднего фронта; в — формирование ступенчатой конфигурации переднего фронта; г — управление параметрами паузы при двухфазном срабатывании ПА; д — управление амплитудой перемещения ПА при $U = \text{const}$

линейная зависимость напряжения U от P . Данный эксперимент показал, что, во-первых, дизельное топливо является достаточно хорошим диэлектриком и, во-вторых, — диапазон предельных давлений, до которых не происходит деполаризация пьезоэлементов, у погружных ПА значительно выше, чем у ПА осевого перемещения.

Это дает надежду на возможность создания на основе погружных ПА ТНВД с рабочими давлениями топлива, присущими современным дизелям. Вышеуказанная особенность погружного ПА, на взгляд авторов, объясняется тем, что его пьезоэлементы, находясь в изотропном силовом поле, испытывают во всех направлениях только напряжения сжатия, тогда как у осевого

ПА нагрузки вызывают в поперечном направлении напряжения растяжения.

Для подтверждения возможности получения объемного пьезоэффекта была разработана и создана экспериментальная установка, представляющая собой объемный насос, у которого в качестве вытеснительного элемента использован наборный погружной ПА с толщиной пьезоэлементов $t = 0,5$ мм.

В эксперименте при подаче на электроды ПА напряжения $U = 295$ В в капиллярной трубке, связанной с камерой сжатия насоса, наблюдался подъем уровня мениска топлива близкий к расчетным значениям.

Абсолютное изменение объема пьезокерамического элемента может быть определено по формуле: $\Delta V_s = SU(2d_{31} + d_{33})$, где S — площадь поперечного сечения пьезоэлемента, U — питающее напряжение, d_{31} и d_{33} — коэффициенты деформации.

Учитывая малые деформационные перемещения ПА, важно оценить возможные минимальные габариты проектируемого ТНВД с погружным ПА с учетом величины цикловой подачи топлива. Наибольшей объ-

емной деформацией обладает пористая керамика. Одним из реальных возможных вариантов является пьезоэлектрический объемный преобразователь на основе композита связностью 1–3 с содержанием керамической фазы 40–50 %.

Из отечественных целесообразно использовать пьезокерамические материалы типа ПКР-7м (производство НИИФ РГУ) или НЦТС-2 (ОАО «ЭЛПА»). Несмотря на пока высокую стоимость, следует оценить возможности материала PMN-PT (монокристалл производства США), величины коэффициентов деформации которого имеют на сегодняшний день рекордные значения.

Определенный интерес для разработчиков топливоподающей аппаратуры представляют

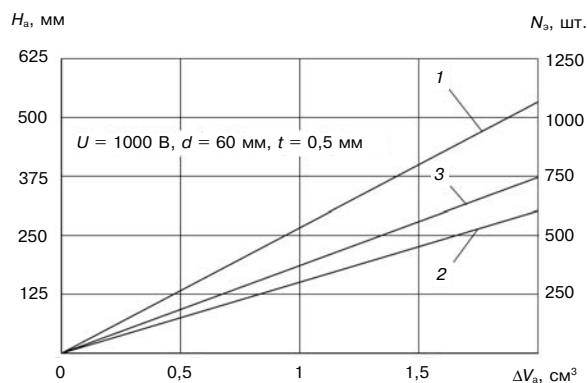


Рис. 6. Влияние величины объемной деформации ΔV_a актюаторов и материалов их наборных элементов на геометрические параметры образцов:
1 — ПКР-7М; 2 — PMN-PT; 3 — МНС-7,5

также электрострикционные материалы. Однако при достаточно высоких значениях объемной деформации их применение ограничено значительно более узким по сравнению с пьезокерамическими материалами интервалом рабочих температур $t_p = 20\text{--}60$ °С. Более того, в процессе изменения температуры значения электрострикционных констант могут существенно (до двух раз) изменяться, что в совокупности усложняет создание приводов для ЭСТ на основе электрострикционных материалов.

На рис. 6 для указанных пьезокерамических материалов и электрострикционной керамики типа МНС-7,5 (композит связностью 1–3 с содержанием керамической фазы 40 %) представлены результаты расчетов высоты H_a наборного столба актюаторов и числа $N_э$ их элементов в зависимости от величины объемной деформации актюатора ΔV_a . Расчеты проводились для элементов диаметром 60 мм и толщиной 0,5 мм при электрическом напряжении питания 1000 В. В случае обеспечения возможности изготовления и надежности работы элементов ПА толщиной $t = 0,125$ мм указанные на рис. 6 значения высот наборных столбов достигаются при $U = 250$ В и в четыре раза большем $N_э$.

Следует отметить, что при дополнительном использовании отрицательного электрического импульса можно в 1,6 раза уменьшить массогабаритные показатели актюаторов.

В реальных условиях величина цикловой подачи может быть значительно снижена за счет сжимаемости топлива в рабочей камере и порях материала актюаторов при высоких давлениях впрыскивания по отношению к ΔV_a . В настоящее время ведется поиск решений по полному или частичному устранению влияния наличия пор в материале на величину цикловой подачи.

Для достижения большей компактности можно применить многосекционную конструкцию

ТНВД. При этом полная высота погружного ПА будет определяться суммарной высотой всех его секций [4].

По результатам выполненных работ можно сделать следующие выводы:

1. Применение в исполнительных устройствах ЭСТ ПА, характеризующихся малыми задержками по исполнению командного сигнала и нанометрической разрешающей способностью по координате перемещения, позволяет осуществлять дальнейшее совершенствование таких систем за счет повышения их надежности работы, расширения технологических возможностей по управлению законом топливоподачи и обеспечения большей цикловой стабильности параметров.

2. Формирование различных дифференциальных характеристик осевого перемещения ПА может осуществляться при неизменном напряжении питания за счет изменения параметров командного сигнала.

3. ПА объемного принципа действия погружного типа по сравнению с ПА осевого перемещения характеризуются значительно более высокими граничными давлениями деполяризации, что позволяет надеяться на возможность создания на их основе предельно простых по конструкции бесплунжерных ТНВД и насос-форсунок с широкими возможностями прямого управления характеристиками подачи топлива.

4. Проведенные экспериментальные исследования позволяют с достаточной уверенностью говорить о возможности создания принципиально новых высокоэффективных систем топливоподачи на основе ПА осевой и объемной деформации.

Литература

1. Пат. 2295049 РФ. Способ управления характеристиками впрыскивания топлива в камеру сгорания двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления. Башкин А.В., Крупский М.Г., Кузин В.Е., Широких Э.В., Головачев А.Д., Сегалла А.Г., Галанов Г.Н., Сафронов А.Я., Климашин В.М., Никифоров В.Г. Заявл. 12.05.2005; опублик. 10.03.2007. Бюл. № 7.
2. Пат. 2263224 РФ. Система подачи топлива в двигатель внутреннего сгорания. Крупский М.Г., Кузин В.Е., Широких Э.В., Головачев А.Д. Заявл. 27.04.2004; опублик. 27.10.2005. Бюл. № 30.
3. Пинский Ф.И., Кузин В.Е. Электроимпульсный метод управления законом подачи топлива // Двигателестроение. — 1984. — № 8. — С. 21–22.
4. Пат. 2298683 РФ. Способ нагнетания и регулирования подачи топлива в форсунку двигателя внутреннего сгорания и устройство для его осуществления. Крупский М.Г., Кузин В.Е., Широких Э.В., Головачев А.Д., Сегалла А.Г., Галанов Г.Н., Сафронов А.Я., Климашин В.М., Никифоров В.Г. Заявл. 04.07.2005; опублик. 10.05.2007. Бюл. № 13.